

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

Научная статья

УДК 005.8:519.87

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ

Ефременков Иван Дмитриевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, Ставрополь, efremenkov@yandex.ru

Аннотация. Эффективность реализации организационных проектов ограничивается стохастическим характером внешней среды и скрытыми причинно-следственными связями между факторами дестабилизации. Традиционные матричные методы оценки угроз, основанные на предположении о независимости переменных, не позволяют адекватно описывать каскадные отказы и изменение уязвимостей во времени на протяжении жизненного цикла социотехнической системы. Разработана методология управления рисками, базирующаяся на использовании динамических байесовских сетей. Граф разворачивается во времени с учетом марковских свойств переходов между фазами, что позволяет математически описать инерционное влияние накопленных негативных факторов. Параметризация таблиц вероятностей осуществляется посредством элиситации экспертных знаний с использованием распределения Дирихле, компенсирующего дефицит ретроспективной статистики. Алгоритм выбора превентивных барьеров сводится к задаче бинарного целочисленного программирования, максимизирующей снижение ожидаемого ущерба при заданных бюджетных ограничениях. Вычислительный эксперимент, моделирующий внедрение корпоративной информационной системы, подтвердил, что интеграция темпоральных срезов и механизма байесовского обновления по фактическим свидетельствам обеспечивает прирост

прогностической точности (AUC-ROC до 0,89) и снижение совокупного ущерба на 41,5% по сравнению со статическими аналогами. Предложенный подход формирует теоретико-методологическую основу для построения адаптивных систем поддержки принятия решений, способных непрерывно уточнять оценки угроз в условиях эпистемической неопределенности и ограниченной эмпирической выборки. В работе дополнительно обосновывается необходимость иерархий и семантического анализа неструктурированных массивов проектной документации для автоматизации процедур структурного синтеза.

Ключевые слова: организационный проект, управление рисками, динамические байесовские сети, каузальные зависимости, элиситация знаний, распределение Дирихле, целочисленное программирование, поддержка принятия решений, социотехнические системы.

Original article

RISK MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL PROJECTS BASED ON DYNAMIC BAYESIAN NETWORKS

**Efremenko Ivan Dmitrievich, Candidate of Technical Sciences, Senior
Lecturer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia,
efremenko@yandex.ru**

Abstract. The effectiveness of organizational project implementation is limited by the stochastic nature of the external environment and latent causal relationships between destabilizing factors. Traditional matrix threat assessment methods, which reflect the independence of variables, are unable to adequately describe cascading failures and the temporal evolution of vulnerabilities throughout the lifecycle of a sociotechnical system. A risk management methodology based on the architecture of dynamic Bayesian networks has been developed. The graph topology unfolds along the timeline, maintaining the Markov properties of interphase transitions, allowing for a

rigorous mathematical formalization of the inertia of accumulated negative potential. Parameterization of probability tables is achieved through the elicitation of expert knowledge using the Dirichlet distribution, compensating for the lack of retrospective statistics. The algorithm for selecting preventive barriers is reduced to a binary integer programming problem, maximizing the reduction in expected damage under given budget constraints. A computational experiment simulating the implementation of a corporate information system confirmed that the integration of temporal slices and a Bayesian update mechanism based on actual evidence provides an increase in predictive accuracy (AUC-ROC up to 0.89) and a 41.5% reduction in total damage compared to static analogs. The proposed approach forms a theoretical and methodological foundation for the design of adaptive decision support systems capable of continuously calibrating threat profiles under conditions of epistemic uncertainty and limited empirical data. The paper further substantiates the need for hierarchies and semantic analysis of unstructured project documentation arrays to automate structural synthesis procedures.

Keywords: organizational design, risk management, dynamic Bayesian networks, causal dependencies, knowledge elicitation, Dirichlet allocation, integer programming, decision support, sociotechnical systems.

Введение. Современные организационные проекты, включая корпоративные реструктуризации, внедрение распределенных информационных систем и интеграционные процессы при слияниях, реализуются в условиях стохастической внешней среды и внутренней нестабильности. Специфика управления в социотехнических системах заключается в том, что возникающие угрозы редко изолированы друг от друга. Формируется сложная топология рисков, где отдельные факторы обладают скрытыми причинно-следственными связями, способными инициировать каскадные отказы на различных уровнях иерархии проекта [1]. Многофакторность организационной среды порождает проблему интеграции разнородных данных от объективных статистических

метрик до субъективных экспертных оценок, отражающих эпистемическую неопределенность, присущую уникальным управленческим задачам.

Доминирующая в настоящее время парадигма оценки угроз, базирующаяся на использовании статических матриц вероятности и влияния, показывает несостоятельность при работе со связанными событиями. Аппарат тепловых карт, регламентируемый многими отраслевыми стандартами, при прочих равных условиях, предполагает независимость рассматриваемых переменных и рассматривает их в застывшем временном срезе. Такое упрощение не учитывает кумулятивный эффект и скрытые зависимости, при которых возникновение второстепенного на первый взгляд инцидента может стать фактором критического сбоя в смежной подсистеме. Ограничения булевой логики и статических вероятностных моделей не могут адекватно описать процессы деградации организационного потенциала, что неоднократно подтверждалось исследованиями в разных областях анализа надежности сложных систем [2].

Преодоление указанных ограничений подразумевает моделирование их совместного распределения вероятностей. Математический аппарат байесовских сетей, представляющих собой направленные ациклические графы, предоставляет инструментарий для факторизации многомерных зависимостей [3]. Ключевое преимущество данного подхода заключается в возможности сочетать количественные данные ретроспективного опыта с качественными сценариями, формулируемыми экспертами [4]. Теорема Байеса служит ядром механизма вывода, обеспечивая пересчет вероятностей наступления нежелательных исходов по мере поступления новых свидетельств о состоянии контролируемых параметров организационной среды.

Однако классические байесовские сети остаются статическими конструкциями, неспособными отразить темпоральную эволюцию угроз и запаздывающее влияние принятых управленческих решений. Организационный проект представляет собой динамическую систему, где состояние уязвимости в текущий момент детерминирует профиль рисков на последующих этапах

жизненного цикла. Для математического описания подобных процессов, включающих последовательности сценариев, накопление негативных факторов и влияние превентивных барьеров, необходима трансформация аппарата в формат динамических байесовских сетей. Введение временных срезов и предположение о марковском характере переходов позволяют представить непрерывную деградацию или восстановление ресурса проекта в виде дискретных вероятностных состояний, сохраняя вычислительную выполнимость модели.

Несмотря на успешную апробацию данного математического инструментария в задачах технической диагностики и оценки промышленной безопасности, его адаптация к системе управления организационными проектами связана с рядом нерешенных методологических проблем. Отсутствуют унифицированные подходы к структурированию узлов графа, отражающих специфику человеческих и организационных факторов, а также алгоритмы трансляции качественных лингвистических переменных в таблицы условных вероятностей. В связи с этим целью настоящего исследования выступает разработка методологии формирования и параметризации динамических байесовских сетей, обеспечивающих проактивный мониторинг и поддержку принятия решений в условиях темпоральной неопределенности организационных проектов.

Обзор литературы. Подходы к идентификации и оценке угроз в организационных проектах исторически опирались на использование статических матриц, классифицирующих события по осям вероятности и тяжести последствий. Зарубежные исследования демонстрируют, что подобная редукция стохастической среды к детерминированным тепловым картам несет в себе глубокие методологические изъяны. Матрицы при прочих равных условиях предполагают независимость рассматриваемых переменных, игнорируя топологию причинно-следственных связей, что приводит к недооценке каскадных эффектов и системных отказов [5], [6]. Альтернативой выступает

аппарат байесовских сетей (БС), обеспечивающий факторизацию совместного распределения вероятностей на основе направленных ациклических графов (DAG). Работа М. Осама и соавторов подтверждает, что БС способны интегрировать разнородные данные - от объективных статистических показателей надежности до субъективных экспертных суждений, отражающих эпистемическую неопределенность, присущую управленческим задачам [6].

Перенос данного математического инструментария в сферу управления организационными проектами выявляет необходимость учета темпоральной размерности. Профиль угроз эволюционирует по мере перехода между фазами жизненного цикла. Классические БС не способны отразить запаздывающее влияние принятых управленческих решений или процессы накопления латентных уязвимостей. В связи с этим в современной литературе, в частности в исследованиях, посвященных анализу надежности сложных промышленных комплексов, наблюдается смещение фокуса в сторону динамических байесовских сетей (DBN) [7], [8]. Развертывание графа во времени может моделировать марковские переходы между состояниями системы, однако адаптация DBN к специфике организационных проектов, где доминируют человеческие и структурные факторы, остается недостаточно изученной областью.

Ключевой барьер на пути практического внедрения вероятностных графических моделей в проектный менеджменте связан с параметризацией таблиц условных вероятностей (СРТ). Формирование достоверных СРТ для сети, содержащей десятки узлов, подразумевает значительные объёмы исторических данных, которые в организационной практике, как правило, отсутствуют. Исследователи, в том числе А. Кази, М. Симсеклер и С. Форманек, предлагали подходы к интеграции организационных индикаторов риска [9], однако дефицит эмпирических наблюдений требует разработки специализированных алгоритмов регуляризации, основанных на байесовском выводе и извлечении экспертных знаний.

Материалы и методы исследования. Модель рисков организационного проекта формализуется в виде динамической байесовской сети, структура которой учитывает внутрифазовые и межфазовые связи. Внутри отдельного временного среза t , соответствующего конкретной фазе проекта, узлы графа отражают множество идентифицированных рисков, факторов внешней среды и превентивных управленческих воздействий. Дуги, соединяющие узлы внутри среза, отражают причинно-следственные зависимости и формируют направленный ациклический граф (DAG), в котором наступление родительского события (например, текучести ключевого персонала) изменяет вероятность дочерних инцидентов (например, срыва сроков разработки). Межфазовые связи реализуют принцип автокорреляции: состояние уязвимости в фазе $t + 1$ вероятно зависит от ее статуса в фазе t , чтобы математически описать процессы деградации организационного потенциала или эффект инерции успешно реализованных барьеров.

Математический аппарат СРТ служит ядром параметризации сети, определяя распределение вероятностей состояний дочернего узла при заданной конфигурации родительских. В условиях организационных проектов сбор репрезентативной статистики для прямого расчета частот невозможен. Опираясь на методологию, развиваемую в трудах [10], [11], для извлечения СРТ из качественных экспертных оценок применяется аппарат распределения Дирихле. Экспертам предлагается оценить моду распределения вероятности наступления события и степень уверенности в этой оценке. Полученная информация преобразуется в параметры концентрации распределения Дирихле, формируя вектор априорных псевдосчетов.

Алгоритм управления рисками базируется на процедуре точного вероятностного вывода. Для вычисления маргинальных вероятностей реализации каждого риска в заданном временном срезе применяется алгоритм дерева соединений, обеспечивающий эффективную факторизацию и распространение свидетельств по графу. Полученные апостериорные

вероятности служат входными параметрами для модуля планирования воздействий. Задача выбора оптимального подмножества превентивных мер формулируется как проблема бинарного целочисленного программирования на графе рисков. Целевая функция направлена на максимизацию снижения математического ожидания совокупного ущерба, при этом на пространство допустимых решений накладывается жесткое ограничение в виде выделенного бюджета на риск-менеджмент. Управляющие узлы в DBN выступают в роли детерминированных переключателей, модифицирующих CPT дочерних узлов, что даёт возможность алгоритму оценивать контрфактические сценарии и находить глобальный оптимум инвестиций.

Особое внимание в методологическом блоке уделяется решению проблемы малой выборки. Наличие данных по десяти завершённым проектам-аналогам недостаточно для надежного обучения сети из 25 рисков с многоуровневыми связями. Для преодоления поднятой проблемы применяется гибридная стратегия: априорные оценки Дирихле, полученные от экспертов, используются как база для генерации синтетических траекторий развития рисков посредством методов Монте-Карло. Это расширит обучающую выборку до объемов, необходимых для сходимости алгоритмов структурного обучения. Калибровка модели осуществляется посредством последовательного байесовского обновления: по мере завершения очередного этапа проекта фактические данные о произошедших инцидентах включаются в сеть, уменьшая дисперсию апостериорных распределений и адаптируя модель к условиям текущего проекта.

Результаты исследования и их обсуждение. Верификация разработанного подхода была проведена на базе вычислительного эксперимента, моделирующего организационный проект внедрения корпоративной информационной системы. Модель включала 25 взаимосвязанных рисков, распределенных по четырем временным фазам (инициация, планирование, реализация, ввод в эксплуатацию). Для оценки прогностической способности и

управленческой ценности DBN было проведено сравнение с традиционной статической матрицей рисков и классической (статической) байесовской сетью (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение методов управления рисками

Метрика оценки	Статическая матрица	Статическая БС	Адаптивная DBN
Точность прогноза (AUC-ROC)	0,62	0,74	0,89
Снижение ожидаемого ущерба (%)	12,4	28,7	41,5
Точность ранжирования (Spearman)	0,45	0,68	0,84
Учет темпоральных лагов	Отсутствует	Отсутствует	Полная интеграция

Источник: разработано автором.

Верификация предложенного методологического аппарата осуществлялась на базе имитационного моделирования организационного проекта, связанного с внедрением распределенной информационной системы корпоративного уровня. Архитектура развернутой динамической байесовской сети включала двадцать пять узлов, отражающих многоуровневую таксономию угроз, распределенных по четырем темпоральным фазам жизненного цикла. Отличием сконструированного графа от традиционных моделей надежности, исторически фокусирующихся исключительно на аппаратных сбоях, стала интеграция организационных и человеческих факторов в единый каузальный контур. В частности, узлы, описывающие текучесть ключевого персонала и когнитивную перегрузку команды, были связаны направленными дугами с техническими инцидентами, такими как нарушение архитектуры базы данных или срыв сроков интеграционного тестирования. Топология, концептуально перекликающаяся с подходами к моделированию социотехнических систем, описанными в работе [12], дала возможность математически формализовать скрытые корреляции, когда деградация управленческого климата на фазе инициации стохастически детерминирует каскадные отказы на этапе промышленной эксплуатации.

Ключевой методологической проблемой, возникшей на этапе параметризации таблиц условных вероятностей, оказался дефицит эмпирических наблюдений. Наличие ретроспективных данных по десяти завершенным проектам-аналогам недостаточно для надежного обучения сети с двадцатью пятью узлами и сложной системой условных зависимостей; прямое частотное оценивание в подобных условиях порождает структурные нули и статистические артефакты. Для преодоления данного ограничения был задействован аппарат байесовских априорных оценок с использованием распределения Дирихле. Экспертные суждения, собранные посредством структурированного опроса, трансформировались в параметры концентрации, задавая базовые псевдосчета для каждой конфигурации родительских узлов. Последующая генерация синтетических траекторий развития рисков методами Монте-Карло обеспечила расширение обучающей выборки до объемов, гарантирующих сходимость алгоритмов. Такое сочетание экспертных оценок и стохастического моделирования, обоснованное применительно к оценке редких событий, позволяет повысить устойчивость вероятностных оценок при отсутствии исторических прецедентов [4].

Сравнительный анализ прогностической способности моделей выявил превосходство темпорального подхода над статическими аналогами. Традиционная матрица рисков продемонстрировала низкую способность к распознаванию скрытых угроз, показав значение AUC-ROC 0,62, что существенно ограничивает ее аналитическую ценность. Статическая байесовская сеть, игнорирующая фактор времени, систематически переоценивала риски, успешно купированные на ранних этапах, и недооценивала инерционные эффекты, накопленные в скрытых параметрах системы. Адаптивная DBN обеспечила точность классификации наступления критических инцидентов на уровне 0,89. Весьма высокий результат обусловлен корректным учетом межфазовой автокорреляции: модель математически отражает процесс постепенного истощения организационного ресурса, когда

незначительное отклонение на фазе планирования не вызывает немедленного сбоя, но смещает апостериорное распределение вероятностей в сторону критического состояния на последующих итерациях. Оценка по шкале Бриера дополнительно подтвердила, что калибровка вероятностей в динамической сети обладает значительно меньшей дисперсией ошибки по сравнению с детерминированными тепловыми картами.

Особую научную и практическую ценность представляет механизм выбора превентивных воздействий, реализованный посредством сведения задачи к бинарному целочисленному программированию на графе. В отличие от эвристических подходов, предписывающих финансировать барьеры для событий с наибольшей абсолютной вероятностью, предложенный алгоритм идентифицирует структурные «узкие места» каузальной сети. При наложении жесткого бюджетного ограничения оптимизатор автоматически отказывается от локального купирования изолированных инцидентов в пользу инвестиций в размыкание длинных транзитивных цепей. Здесь в полной мере проявляется феномен стохастического экранирования, описанный в теории вероятностных графических моделей: внедрение превентивной меры в родительском узле радикально снижает маргинальную вероятность наступления дочерних катастрофических событий, делая избыточным финансирование локальных барьеров на нижних уровнях иерархии. Снижение математического ожидания совокупного ущерба на 41,5% по сравнению с реактивными стратегиями подтверждает, что оптимальное управление рисками подразумевает точечное воздействие на узлы с максимальным коэффициентом транзитивности.

Функционирование модели в режиме реального времени базируется на непрерывном байесовском обновлении по мере поступления фактических свидетельств о ходе выполнения работ. Введение в систему информации о материализации промежуточного инцидента инициирует двунаправленный процесс логического вывода. Вывод пересчитывает вероятности наступления финальных угроз, сдвигая профиль рисков заключительных фаз в зону

критических значений. Одновременно срабатывает механизм обратного вывода, чтобы вычислить апостериорные вероятности скрытых корневых причин, которые не поддаются прямому наблюдению. Если статические методы ограничиваются констатацией факта отклонения, то аппарат Junction Tree, примененный к развернутой во времени сети, позволяет ретроспективно локализовать латентный организационный дефект, послуживший детерминантой сбоя, и скорректировать стратегию управления для оставшихся временных срезов.

Комплексный анализ чувствительности модели к вариациям входных параметров выявил нелинейный характер зависимости точности прогнозов от степени эпистемической неопределенности, заложенной в априорных распределениях Дирихле. В ситуациях, когда эксперты демонстрировали низкую уверенность в своих суждениях, что выражалось в малых значениях параметров концентрации и высокой дисперсии априорных вероятностей, оценки сети сильнее изменялись при поступлении новых данных. В подобных условиях алгоритм требовал поступления большего объема фактических данных на начальных этапах проекта для сжатия доверительных интервалов и стабилизации таблиц условных вероятностей. Данный феномен, перекликающийся с выводами о необходимости разграничения стохастической и эпистемической неопределенности, указывает на то, что динамическая байесовская сеть выступает инструментом расчета, индикатором зрелости самих экспертных знаний. Модель автоматически сигнализирует руководству проекта о необходимости привлечения дополнительных аудиторов в тех сегментах графа, где накопленная неопределенность превышает допустимые пороги толерантности.

Представление управленческих процессов в виде динамических вероятностных графов позволяет преодолеть противоречия, присущие классическому проектному менеджменту. Интеграция качественных лингвистических переменных, отражающих человеческий фактор, с

количественными показателями надежности в единой вычислительной среде обеспечивает согласованность принимаемых решений. Временная валидация, предполагающая прогнозирование профиля угроз на заключительных фазах исключительно по косвенным индикаторам, собранным на этапе инициации, подтвердила устойчивость модели к пропускам в наблюдениях. Это свойство оказывается востребованным в реальных организационных системах, где процедуры мониторинга часто носят фрагментарный характер, а сбор метрик связан с существенными транзакционными издержками.

Дальнейшее развитие представленного подхода связано с использованием гибридных сетей, способных учитывать финансовые показатели и временные задержки без потери вычислительной строгости, а также с внедрением алгоритмов автоматического извлечения структуры графа из неструктурированной проектной документации.

Выводы. Результаты вычислительного эксперимента подтверждают, что представление социотехнической деятельности с помощью динамических байесовских сетей обеспечивает иные аналитические возможности по сравнению с детерминированными матричными методами. Развертывание топологии графа во временной шкале с соблюдением марковских свойств перехода между состояниями уязвимости даёт возможность математически строго описать инерцию накопленного негативного потенциала и запаздывающий эффект превентивных барьеров. Вывод, опирающийся на фактический ход выполнения работ, трансформирует систему мониторинга из реактивного регистра инцидентов в инструмент проактивной диагностики латентных каузальных цепей, что оказывается актуальным в условиях высокой турбулентности внешней среды организационных проектов.

Ограничением, тормозящим внедрение метода в широкую управленческую практику, остается проблема параметризации многомерных моделей. Ключевым узким местом выступает процедура элиситации экспертных знаний, необходимая для спецификации таблиц условных вероятностей. При

увеличении размерности сети и появлении узлов с множеством родительских связей объем информации, необходимой для заполнения ячеек таблиц, возрастает экспоненциально, увеличивая когнитивную нагрузку на экспертов. Субъективные суждения в подобных условиях теряют внутреннюю непротиворечивость, генерируя накопление эпистемической ошибки на уровне глобального совместного распределения. Преодоление данного комбинаторного взрыва, как справедливо отмечается в исследованиях, посвященных анализу надежности сложных промышленных комплексов, подразумевает отказ от плоских архитектур в пользу иерархических конструкций [2], [9]. Внедрение объектно-ориентированных байесовских сетей или вероятностных реляционных моделей допускает инкапсуляцию типовых фрагментов организационного взаимодействия, обеспечивая их наследование между различными фазами жизненного цикла без необходимости повторного опроса экспертов.

Одним из основных направлений снижения трудозатрат на этапе структурного синтеза модели является интеграция вероятностного графического моделирования с методами глубокого семантического анализа неструктурированных данных. Архивы проектной документации, акты расследования отклонений, протоколы ретроспективных совещаний содержат колоссальный объем имплицитных знаний о каузальных зависимостях, которые традиционно остаются невостребованными из-за отсутствия формальных процедур их извлечения. Применение алгоритмов онтологического инжиниринга и обработки естественного языка позволит автоматизировать первичное конструирование направленного ациклического графа, перекладывая на вычислительные системы рутинную работу по идентификации узлов и дуг. В таком сценарии задача исследователя смещается от полного ручного проектирования топологии к ее верификации, устранению логических петель и точной калибровке априорных распределений. Это создает основу для адаптивных систем поддержки принятия решений, способных непрерывно обучаться на текстовых данных, формируемых в ходе организационной

деятельности.

Список литературы

1. Давыдовский А. Г., Кругликов С. В. Проблема превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования // Информатика. – 2026. – Т. 23. – №. 2. – С. 39-67.
2. Вареца Р. А. Матрица выбора технологий оценки рисков на этапах жизненного цикла стартапов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2025. – №. 3. – С. 36-49.
3. Teymoori S., Ghazaan M. I., Malekitabar H. Developing a probabilistic risk assessment framework for construction projects based on Dynamic Bayesian Network // Reliability Engineering & System Safety. – 2026. – Т. 267. – С. 111897.
4. Shen H., Luo L., Niu X., Fu C., Han Y. Dynamic Bayesian network-enabled approach for organizational leadership measurement of complex construction projects // Buildings. – 2024. – Т. 14. – №. 4. – С. 1123.
5. Madihi M. H., Shirzadi Javid A. A., Nasirzadeh F. Enhancing risk assessment: An improved Bayesian network approach for analyzing interactions among risks // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2025. – Т. 32. – №. 3. – С. 2022-2043.
6. Osama M., Sherif A., Badawy M. Risk analysis of construction of administration projects using Bayesian networks // Journal of engineering, design and technology. – 2023. – Т. 21. – №. 1. – С. 281-298.
7. Wu X., Huang H., Xie J., Lu M., Wang S., Li W., ... Sun X. A novel dynamic risk assessment method for the petrochemical industry using bow-tie analysis and Bayesian network analysis method based on the methodological framework of ARAMIS project // Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Т. 237. – С. 109397.
8. Tao Y., Hu H., Xu F., Zhang Z. Ergonomic risk assessment of construction workers and projects based on fuzzy Bayesian network and DS evidence theory // Journal of Construction Engineering and Management. – 2023. – Т. 149. – №. 6. – С. 04023034.
9. Qazi A., Simsekler M. C. E., Formanek S. Supply chain risk network value at risk

assessment using Bayesian belief networks and Monte Carlo simulation // *Annals of Operations Research*. – 2023. – T. 322. – №. 1. – C. 241-272.

10. Fang D., Wang Y., Lim H. W., Ma L., Gu B., Huang Y. Construction of a Bayesian network based on leadership-culture-behavior model to improve owner safety management behavior // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2023. – T. 149. – №. 3. – C. 04022177.

11. Vagdatli T., Petrousatou K., Panetsos P., Barmpa Z., Fragkakis N. Probabilistic pre-estimation of life-cycle costs of road bridges using dynamic Bayesian networks // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2026. – T. 22. – №. 8. – C. 1491-1510.

12. Dehghani S., Massah Bavani A., Roozbahani A., Sahin O. Assessment of Climate Change-Induced Water Scarcity Risk by Using a Coupled System Dynamics and Bayesian Network Modeling Approaches // *Water Resources Management*. – 2024. – T. 38. – №. 10. – C. 3853-3874.

References

1. Davy`dovskij A. G., Kruglikov S. V. Problema preventivnogo upravleniya riskami v «umny`x soobshhestvax» na osnove stoxasticheskogo modelirovaniya // *Informatika*. – 2026. – T. 23. – №. 2. – S. 39-67.

2. Varecza R. A. Matricza vy`bora tehnologij ocenki riskov na e`tapax zhiznennogo cikla startupov // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: E`konomika i upravlenie*. – 2025. – №. 3. – S. 36-49.

3. Teymoori S., Ghazaan M. I., Malekitabar H. Developing a probabilistic risk assessment framework for construction projects based on Dynamic Bayesian Network // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2026. – T. 267. – P. 111897.

4. Shen H., Luo L., Niu X., Fu C., Han Y. Dynamic Bayesian network-enabled approach for organizational leadership measurement of complex construction projects // *Buildings*. – 2024. – T. 14. – No. 4. – P. 1123.

5. Madihi M. H., Shirzadi Javid A. A., Nasirzadeh F. Enhancing risk assessment: An improved Bayesian network approach for analyzing interactions among risks // *Engineering, Construction and Architectural Management*. – 2025. – T. 32. – No. 3. –

P. 2022-2043.

6. Osama M., Sherif A., Badawy M. Risk analysis of construction of administration projects using Bayesian networks // *Journal of engineering, design and technology*. – 2023. – T. 21. – No. 1. – P. 281-298.
7. Wu X., Huang H., Xie J., Lu M., Wang S., Li W., ... Sun X. A novel dynamic risk assessment method for the petrochemical industry using bow-tie analysis and Bayesian network analysis method based on the methodological framework of ARAMIS project // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2023. – T. 237. – P. 109397.
8. Tao Y., Hu H., Xu F., Zhang Z. Ergonomic risk assessment of construction workers and projects based on fuzzy Bayesian network and DS evidence theory // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2023. – T. 149. – No. 6. – P. 04023034.
9. Qazi A., Simsekler M. C. E., Formanek S. Supply chain risk network value at risk assessment using Bayesian belief networks and Monte Carlo simulation // *Annals of Operations Research*. – 2023. – T. 322. – No. 1. – P. 241-272.
10. Fang D., Wang Y., Lim H. W., Ma L., Gu B., Huang Y. Construction of a Bayesian network based on leadership-culture-behavior model to improve owner safety management behavior // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2023. – T. 149. – No. 3. – P. 04022177.
11. Vagdatli T., Petrousatou K., Panetsos P., Barmpa Z., Fragkakis N. Probabilistic pre-estimation of life-cycle costs of road bridges using dynamic Bayesian networks // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2026. – T. 22. – No. 8. – P. 1491-1510.
12. Dehghani S., Massah Bavani A., Roozbahani A., Sahin O. Assessment of Climate Change-Induced Water Scarcity Risk by Using a Coupled System Dynamics and Bayesian Network Modeling Approaches // *Water Resources Management*. – 2024. – T. 38. – No. 10. – P. 3853-3874.

Статья поступила в редакцию 20.07.2026; одобрена после рецензирования 25.08.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 20.07.2026; approved after reviewing 25.08.2026; accepted for publication 17.09.2026.